

УДК 796.015.52+612.76

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕНАЖЕРОВ СО МНОГИМИ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

*Сотский Н.Б.*

Белорусский государственный университет физической культуры,  
г. Минск, Республика Беларусь  
e-mail: nsotsky@gmail.com

*Рассмотрены прикладные аспекты, связанные с использованием методики определения и записи позы человека для анализа биомеханических и физиологических особенностей выполнения силовых упражнений с применением специальных тренажеров. Предложена и реализована концепция фрикционных силовых тренажеров со многими степенями свободы.*

**Ключевые слова:** поза, суставной угол, степени свободы, тренажер.

### Введение

Анализ динамических и кинематических характеристик современных силовых тренажеров [1] показывает, что тренировка с их использованием имеет ряд принципиальных проблем: отсутствие возможности тренировать мышцы в режимах, соответствующих реальным пространственным движениям, в которых задействовано одновременно несколько степеней свободы суставных движений, неконтролируемые инерционные силы, а также необходимость рассеивания циркулирующей в ходе выполнения упражнения механической энергии.

В работе [2] предложено представление любого двигательного действия человека в виде совокупности трех программ. Это программа места, представляющая собой описание того, как должен двигаться общий центр масс тела человека, программа ориентации, описывающая вращение тела как целого, и программа позы. Последняя представляет собой описание суставных движений, являющихся основой любого двигательного действия.

В ходе двигательного действия варианты работы мышц, обеспечивающих положение в суставах, могут быть представлены в виде двух основных групп. Это элементы осанки, образующие из звеньев тела конструкцию для выполнения упражнения, и управляющие движения, через которые она получает необходимую энергетику. Режим работы каждой из групп имеет свои особенности. Для элементов осанки характерен статический или уступающий ре-

жим, а для управляющих движений, как правило, динамический, преодолевающий. Вопрос соответствия кинематических и динамических параметров работы суставов при выполнении физических упражнений может быть решен в ходе анализа программы изменения позы.

До настоящего времени возможности исследования позы и ее изменений ограничивались плоскостными вариантами двигательных действий, поскольку предложенные ранее методы [3] не позволяли однозначно описать пространственные движения, в которых суставы могли бы использовать одновременно более одной степени свободы.

Целью настоящей работы являлось построение метрологического обеспечения силовой тренировки с использованием тренажеров как системы взаимодействующих элементов со многими степенями свободы для приведения в соответствие создаваемой нагрузки биомеханическим и физиологическим особенностям тренировки, приближения кинематических и динамических параметров последней к реальным значениям, имеющим место при выполнении двигательных действий в спорте и в повседневной жизни.

### Основная часть

Как показано в статье [4], суставные движения с анатомически возможными для них степенями свободы могут быть выражены через углы Эйлера, образованные системами координат, жестко связанными с сочлененными в

каждом суставе звеньями. Это позволяет получить методику исследования любых пространственных изменений позы человека.

В соответствии с предложенной моделью результаты измерения суставных углов представляются в виде трех матриц, каждая из которых относится к определенному типу суставного движения (сгибательно-разгибательных, ротаций и циркумдукций). Строки каждой матрицы соответствуют биокинематическим цепям, а столбцы – суставам в этих цепях. В каждой ячейке записывается соответствующий суставной угол, численно либо в виде функции времени. Пример упражнения на тренажере представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Пример силового упражнения:  
а – исходное положение ног, б – конечное

Запись изменения позы в матричной форме, где нулевые значения соответствуют положению суставов в позе основной стойки, а временные зависимости соответствуют выполнению суставных движений, для представленного упражнения имеет вид:

$$\Phi_{ij1} = \begin{pmatrix} 0 & 180 & 0 & 0 \\ 0 & 180 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \Phi_{ij2} = \begin{pmatrix} 45 & 90t & 0 & 0 \\ 45 & 90t & 0 & 0 \\ 0 & 110 & 0 & 0 \\ 0 & 110 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\Phi_{ij3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Предложенный метод был использован для исследования упражнений на типичных стационарных тренажерах, использующих для создания нагрузки силы тяжести, упругости, а также силы диссипативного характера [5]. Анализ полученных результатов показал, что в рекомендуемых методикой упражнениях нагружаемые суставные движения относились к одному типу. Как правило, это были действия сгибательно-разгибательного характера. Более того, оказалось, эта ограниченность нагрузки в отношении одновременно нескольких степеней свободы суставных движений является принципиальной проблемой всех устройств такого рода, поскольку тренировочное сопротивление, создаваемое действием силы тяжести, упругости, а также диссипативными силами (имеются в виду существующие конструкции), имеет линейный характер. Создание пространственного силового поля из набора линейных элементов силового сопротивления представляется достаточно сложной инженерной задачей.

Следует также отметить и другие аспекты, усложняющие адаптацию биомеханических и физиологических условий силовой тренировки с использованием существующего оборудования к ситуациям, востребованным в спорте или повседневной жизни. Прежде всего, это неконтролируемая инерционность перемещаемых масс и необходимость рассеивания энергии, циркулирующей в ходе выполнения упражнений. При использовании для обеспечения тренировочной нагрузки сил упругости инерционная составляющая нагрузки снижается, однако имеет место нехарактерная для реальных ситуаций зависимость усилия от величины деформации упругого элемента и уже упоминавшаяся необходимость рассеивания энергии.

Проблемы рассеивания энергии и инерционности решает использование диссипативных сил (велотренажеры, устройства с пневмо- или гидроцилиндрами), однако их использование в существующих конструкциях принципиально не решает задачу обеспечения нагрузки пространственного характера одновременно для нескольких степеней свободы суставных движений.

Традиционно для тренировки пространственных движений используют свободный вес (гири, гантели и др.). В этом случае перечисленные выше проблемы очевидны – неконтролируемая инерционность и необходимость рассеивания энергии. Кроме этого, координационная сложность упражнения значительно воз-

растает в результате одновременного воздействия сил различной природы – преодоление силы тяжести, имеющей линейный характер, при одновременном воздействии инерционного сопротивления, которое в случае вращательного движения в конкретном суставе имеет несколько составляющих, зависящих от линейных и угловых ускорений. Инерционные моменты сил могут иметь значительные величины, и проблема их контроля в настоящее время только выходит на практический уровень [6].

Кроме этого, конструктивно задаваемые в стационарных системах жесткие траектории движения звеньев тела тренирующегося в значительной степени ограничивают тренировку упоминавшихся выше элементов осанки, в ходе которых мышцы должны активно обеспечивать ограничение или полную фиксацию определенных суставов. Здесь эту задачу решает конструкция. В результате мышцы тренирующегося привыкают работать в чрезмерно искусственных условиях и при переходе к реальным двигательным действиям могут оказаться не готовыми к проявлению необходимых качеств.

Таким образом, предложенная методика определения позы человека позволила выявить ряд системных недостатков тренировки с использованием существующих на данный момент стационарных силовых тренажеров и поставить задачу разработки нового поколения тренажеров, позволяющих эффективно нагружать пространственные движения, рассеивать энергию и свести к минимуму неконтролируемые инерционные добавки.

Если опорно-двигательный аппарат человека представить в виде многозвенной системы, представляющей собой совокупность биокинематических цепей (руки, ноги, позвоночник), то можно предположить, что суть обеспечения тренировочной нагрузки при выполнении силовых упражнений с использованием тренажеров или тренировочных устройств состоит в создании системы замыкания биокинематических цепей. Это либо их замыкание на опору, характерное для стационарных конструкций, либо между собой, используемое в портативных системах.

Для рассматриваемой модели устройство, создающее тренировочное сопротивление, можно представить в виде вектора-замыкателя  $R$  (рисунок 2), природа которого может быть самой различной. Его свойство проявляется в сопротивлении изменению его длины и пространственной ориентации.

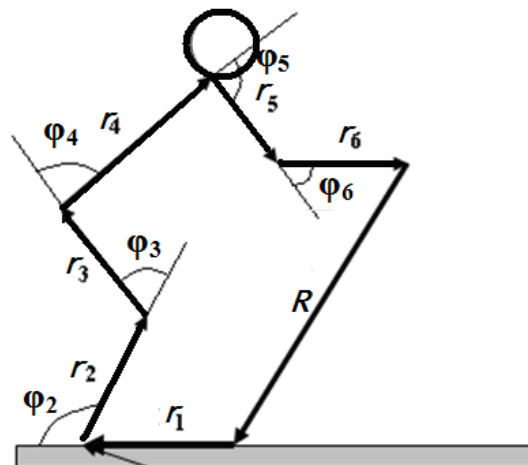


Рисунок 2 – Модель создания тренировочного сопротивления

Свойство замкнутой векторной цепи состоит в равенстве нулю суммы всех составляющих ее векторов. Математически это можно представить в виде следующего уравнения:

$$\sum r_i + R = 0.$$

В рассматриваемом случае любое суставное движение, осуществляемое действием мышц, приводит к изменению длины и (или) пространственной ориентации вектора-замыкателя и тем самым вызывает сопротивление, преодоление которого может быть используется для тренировки. Величина и пространственная ориентация вектора-замыкателя может быть представлена в виде зависимости от конфигурации биокинематической цепи, определяемой суставными углами:

$$R = -\sum r_i = F(\varphi_i, t),$$

где  $\varphi_i$  – суставные углы;  $t$  – время.

Таким образом, упражнение формально представляется в виде зависимости параметров вектора-замыкателя  $R$  от суставных углов, управляемых мышцами тренирующегося.

В соответствии с решаемой задачей свойства вектора-замыкателя должны быть такими, чтобы изменение его пространственной конфигурации сопровождалось сопротивлением, а силовое поле этого сопротивления имело пространственный характер при минимальной инерционности и эффективном рассеивании энергии.

Решение такой задачи видится в использовании сил диссипативного характера, которые весьма эффективно рассеивают механическую

энергию, переводя ее в тепло. Конструктивно это возможно при использовании сопротивления партнера, который может создать практически любое пространственное поле сил сопротивления, например, при выполнении силовых упражнений в парах в ходе тренировки борцов. Существенным недостатком такой схемы является слабый объективный контроль создаваемой нагрузки, а также зависимость последней от особенностей работы сопротивляющегося партнера.

Теоретически возможно использование вязкой среды. Например, если поместить тренирующегося в емкость с тестовидной массой, то любые его пространственные движения будут испытывать сопротивление. Здесь также имеются проблемы. Они связаны с зависимостью силы вязкого трения от скорости перемещения звеньев и их площади, что при выполнении пространственных движений в рассматриваемой ситуации слабо поддается контролю.

На наш взгляд, наиболее приемлемым подходом представляется использование шарнирно-рычажного устройства с регулируемым сопротивлением пространственному изменению углового положения каждого шарнира. При этом шарниры должны обладать, как и основные суставы тела человека, несколькими степенями свободы. Для этой цели могут быть использованы сферические шарниры с возможностью изменения степени из зажима.

В конструкции таких устройств могут быть использованы легкие трубчатые материалы, что существенно снижает инерционные составляющие нагрузки, а использование силы трения позволяет обеспечить эффективное рассеивание энергии. Кроме этого, использование фрикционного способа создания тренировочной нагрузки представляет удобство в отношении практического отсутствия зависимости усилия сопротивления от амплитуды и скорости движения в шарнирах.

В настоящее время описанная концепция реализована нами в целом ряде серийных устройств. Это, прежде всего, тренажеры класса «Спортивный зал в портфеле» – Бизон-1 и Бизон-2, запатентованные в ряде государств [7; 8] и экспортируемые в страны ближнего и дальнего зарубежья. На рисунке 3 показано устройство тренажера Бизон-1. Он в соответствии с приведенными соображениями, является замыкателем таких биокинематических цепей, как руки. При этом каждый шарнир об-

ладает тремя степенями свободы, а сама конструкция – еще шестью (три поступательными и тремя вращательными). В результате тренирующийся получает возможность выполнения значительного количества упражнений с нагрузкой пространственного характера.

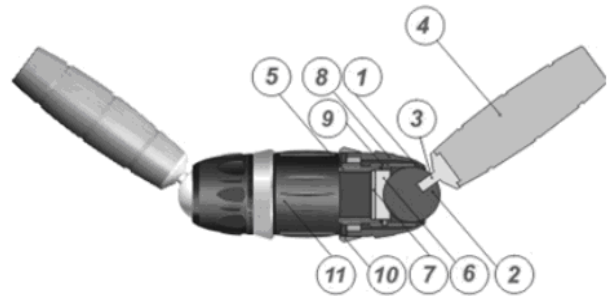


Рисунок 3 – Тренажер класса «Спортивный зал в портфеле» Бизон-1: 1 – удерживающее кольцо; 2 – шар; 3 – стержень; 4 – рукоятка; 5 – соединительная втулка с прорезями для фиксаторов; 6 – фрикционный элемент; 7 – шайба; 8 – регулировочное кольцо; 9 – фиксатор; 10 – буферное кольцо; 11 – пластмассовая накладка соединительной втулки

## Заключение

Метрологическое обеспечение измерений позы человека, его использование для анализа кинематических и динамических особенностей выполнения упражнений на силовых тренажерах позволили выявить системные недостатки существующего подхода к проектированию устройств для силовой тренировки и обосновать возможность создания для этой цели тренажеров со многими степенями свободы.

Новые тренажерные системы конструируются соответственно биокинематическим цепям человека в виде шарнирно-рычажных устройств с фрикционным способом создания тренировочного сопротивления и размещением средств управления нагрузкой в самих шарнирах.

Использование шарниров с несколькими степенями свободы, а также создание тренировочного сопротивления силами диссипативного характера позволяет создать в ходе тренировки пространственное силовое поле нагрузки, значительно снизить неконтролируемые инерционные добавки, а также обеспечить эффективное рассеивание механической энергии, циркулирующей в ходе выполнения тренировочных упражнений.

Существенное облегчение конструкции в значительной мере снизит неконтролируемые инерционные добавки, а использование для создания нагрузки диссипативных сил позволяет эффективно рассеивать механическую энергию, циркулирующую в ходе выполнения упражнений.

### Список использованных источников

1. Сотский, Н.Б. О перспективе фрикционных тренажеров со многими степенями свободы / Н.Б. Сотский // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету ім. Т.Г. Шевченка. Сер. Педагогічні науки. Фізичне виховання та спорт. – Чернігів : ЧНПУ, 2014. – Вип. 118. – Т. 2. – С. 58–63.
2. Назаров, В.Т. Движения спортсмена / В.Т. Назаров. – Минск : Полымя, 1984. – 176 с.
3. Способ определения позы человека / а.с. 1463231 СССР / В.Т. Назаров, Н.Б. Сотский [и др.] опубл. 07.03.1989 // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 9. – С. 45.
4. Сотский, Н.Б. Поза спортсмена: Определение и измерение / Н.Б. Сотский // Метрология и приборостроение. – 2014. – № 2. – С. 37–40.
5. Сотский, Н.Б. Кинематика и динамика выполнения упражнений на стационарных силовых тренажерах / Н.Б. Сотский // Наука и техника. – 2014. – № 4. – С. 87–94.
6. Сотский, Н.Б. О методике расчета мышечного компонента суставного момента силы при выполнении спортивных движений на примере фазы отталкивания прыжка в длину / Н.Б. Сотский, Е.В. Короткевич // Мир спорта. – 2012. – № 3. – С. 21–26.
7. Устройство для тренировки мышц: Евразийский патент 04347 МПК [7] A63B 21/012 / Н.Б. Сотский; заявитель Н.Б. Сотский – заявка ЕА200200805 от 26.07.2002; опубл. В1 2004.04.29.
8. Устройство для тренировки мышц пальцев рук: Патент РБ № 9761; МПК (2006) A63B 23/035 / В.Г. Киселев, Н.Б. Сотский; заявитель Н.Б. Сотский; № заявки 2450; опубл. 2007.10.30.

---

## METROLOGICAL MAINTENANCE OF SIMULATORS WITH MANY AMOUNTS OF FREEDOM

Sotsky N.B.

The Belarus State University of Physical Culture, Minsk, Belarus  
e-mail: nsotsky@gmail.com

**Abstract.** In article the applied aspects connected with use of a procedure of definition and record of a pose of the person for the analysis of biomechanical and physiological features of performance of power exercises with use of special simulators are considered. On the basis of carried out research the concept of frictional power simulators with many amounts of freedom is offered and realized.

**Keywords:** pose, articulate angle, amounts of freedom, simulator.

### References

1. Sotsky N.B. [About prospect of frictional simulators with many amounts of freedom]. *Visnik natsionalnogo pedagogicheskogo universitetu imeny T.G. Shevchenko. Seriya Pedagogichnye nauki. Fizichnoe vyhovannia ta sport.* Chernigov, 2014. Vol. 118, pp. 58–63 (in Ukrainian).
2. Nazarov V.T. *Dvizheniya sportsmena* [Movements of the sportsman]. Minsk, Polymja Publ., 1984, 176 p. (in Russian).
3. Nazarov V.T., Sotsky N.B., Kiselev V.G., Skuratovich A.S. *Sposob opredelenija pozy cheloveka* [The way of definition of a pose of the person] Patent SU, no. 1463231, 1989.
4. Sotsky N.B. [Pose of the sportsman: Definition and measurement]. *Metrologiya i mashinostroyeniye*. 2014, № 2, pp. 37–40. (in Russian).

5. Sotsky N.B. [Kinematics and dynamics of performance of exercises on stationary power simulators]. *Nauka i tekhnika*. 2014, № 4, pp. 87–104 (in Russian).
6. Sotsky N.B., Korotkevich E.V. [To design procedure of a muscular component of an articulate instant of force at performance of sports movements on an example of a phase of pushing away of a broad jump]. *Mir sporta*. 2012, № 3, pp. 21–26 (in Russian).
7. Sotsky N.B. *Ustrojstvo dlya trenirovki myshc* [An arrangement for training muscles]. Patent EA no 04347, 2004.
8. Kiselev V.G. Sotsky N.B. *Ustrojstvo dlya trenirovki myshc paltsev ruk* [An arrangement for training muscles of fingers of hands]. Patent RB no 9761. 2007.

*Поступила в редакцию 28.10.2014.*